

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральная заочная физико-техническая школа
при Московском физико-техническом институте
(государственном университете)**

ФИЗИКА

Тепловые явления

Задание №2 для 8-х классов

(2010-2011 учебный год)



г. Долгопрудный, 2010

Составитель: С.Д. Кузьмичёв, доцент кафедры общей физики МФТИ.

Физика: задание №2 для 8-х классов (2010-2011 учебный год). - М.: МФТИ, 2010, 20с.

Дата присылки заданий по физике и математике – 29 ноября 2010г.

Учащийся должен стараться выполнять **все** задачи и контрольные вопросы в заданиях. Некоторая часть теоретического материала, а также часть задач и контрольных вопросов являются сложными и потребуют от учащегося больше усилий при изучении и решении. В целях повышения эффективности работы с материалами они обозначены символом «*» (звездочка). Мы рекомендуем приступать к этим задачам и контрольным вопросам в последнюю очередь, разобравшись вначале с более простыми.

Составитель:

Кузьмичёв Сергей Дмитриевич

Подписано 22.09.10. Формат 60x90 1/16.

Бумага типографская. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,25

Уч.-изд. л. 1,11. Тираж 1500. Заказ №2-з.

Федеральная заочная физико-техническая школа
при Московском физико-техническом институте
(государственном университете)

ООО «Печатный салон ШАНС»

141700, Москов. обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
ФЗФТШ при МФТИ, тел/факс (495) 408-5145 – **заочное отделение**
тел./факс (495) 409-9351 – **очно-заочное отделение**
тел. 409-9583 – **очное отделение**

e-mail: zftsh@mail.mipt.ru

Наш сайт: www.school.mipt.ru

© ФЗФТШ при МФТИ, 2010

Тепловые явления

Введение

Физические процессы, протекающие в телах при их нагревании или охлаждении, принято называть тепловыми явлениями. Нагревание и охлаждение воздуха, таяние льда, плавление металлов, кипение воды - вот некоторые примеры тепловых явлений.

Исторически сложилось так, что тепловые явления изучаются двумя разделами физики: термодинамикой и молекулярной физикой. Эти разделы отличаются друг от друга различным подходом к изучаемым явлениям. Однако они не противоречат друг другу, а взаимно дополняют.

Уже в Древней Греции люди пытались объяснить природу тёплого и холодного, наделяя каждое тело определённым количеством некоей субстанции (вещества), которую они называли "огнём". Больше всего "огня" при этом, по их воззрениям, находилось в пламени, меньше всего - во льду. Например, нагревание холодного тела горячим телом они пытались объяснить переходом "огня" от тёплого предмета к холодному. Представления древних греков о сущности тёплого и холодного были возрождены наукой средних веков в гипотезе о теплороде или флогистоне. Отголосок этих воззрений сохранился в изменившемся виде в физике до сих пор в той терминологии, которую она использует при объяснении тепловых явлений, т.е. в словах и выражениях, хотя смысл слов стал иным.

Термодинамика или общая теория теплоты является аксиоматической наукой. В её основе лежат общие принципы или, как их называют по-другому, *начала*, являющиеся обобщением опытных данных. Теплота при этом рассматривается как род некоторого внутреннего движения, но что это за движение, какова его природа, термодинамика не конкретизирует.

Это неумение термодинамики вскрыть природу теплоты заставило физиков XIX века попытаться построить молекулярно-кинетическую теорию так, чтобы она могла давать правильные не только качественные, но и количественные ответы.

Молекулярная физика исходит из представления об атомно-молекулярном строении вещества и рассматривает теплоту как непрерывное беспорядочное движение атомов и молекул. Молекулярно-кинетическая теория, в принципе, позволяет дать объяснение любому тепловому процессу или явлению.

Большинство вопросов, затронутых в этом задании, будут изучаться с термодинамической точки зрения, но при этом будут привлекаться также и молекулярно-кинетические представления.

Температура и тепловое равновесие

При изучении тепловых явлений вводится новая физическая величина - температура. Понятие температуры вошло в физику из бытовых представлений тёплого и холодного посредством нашего чувственного восприятия степени нагретости тел. Однако, наши ощущения неоднозначны и зависят от состояния человека и окружающей среды. Так, например, в одной и той же комнате металлические предметы кажутся более холодными, чем деревянные или пластмассовые. Рукой можно грубо отличить холодную воду от горячей, однако мы знаем, что при этом нетрудно и ошибиться.

Прodelайте такой опыт. Одну руку опустите в холодную воду, а другую - в горячую, подержите некоторое время. Затем опустите одновременно обе руки в сосуд с тёплой водой. Та рука, которая была до этого в горячей воде, почувствует холод, рука же, бывшая до этого в холодной воде, ощутит тепло. Этот опыт показывает, что наши ощущения, обычно надёжные, могут оказаться ошибочными, и поэтому желательно иметь такой способ измерения температуры, который не зависел бы от наших ощущений и от нашего настроения.

В физике к понятию температуры приходят через понятие теплового равновесия.

Рассмотрим пример. Пусть в сосуд с холодной водой опускается сильно нагретая стальная деталь, т.е. в контакт приводятся тела, имеющие разные температуры. Опыт показывает, что одно тело (вода) при этом будет нагреваться, а другое (стальная деталь) - охлаждаться. При этом можно наблюдать и видимые признаки изменения состояния тел: раскалённая "докрасна" деталь изменит свой цвет, вода закипит и т.д.

Через некоторое время процессы нагревания и охлаждения прекратятся. Перестанут быть заметными и всякие видимые изменения в состоянии тел. Тогда говорят, что эти два тела (в рассматриваемом примере - вода и стальная деталь) находятся в тепловом равновесии и имеют одинаковые температуры. Тепловое равновесие, как показывает опыт, устанавливается не только в случае соприкосновения двух, но и в случае соприкосновения нескольких тел.

Термоскопы и термометры

Для суждения об одинаковости или различии температур двух тел А и В нет необходимости обязательно приводить их в тепловой контакт друг с другом. Можно для этой цели воспользоваться третьим телом С, приводимым последовательно в контакт с телами А и В. В основе этого способа сравнения температур лежит следующий опытный факт.

Если тело С находится в тепловом равновесии с телами А и В, то тела А и В, приведённые в контакт друг с другом, также будут находиться в тепловом равновесии. Иными словами, если температура тела С равна температурам тел А и В, то тела А и В имеют одну и ту же температуру, равную, по определению, температуре тела С.

Достаточно малое тело С, служащее для установления одинаковости или различия температур двух или нескольких тел, называется термоскопом. Малость тела существенна. Показания массивного термоскопа могут заметно отличаться от показаний маленького термоскопа.

О постоянстве или изменении температуры термоскопа можно судить по изменению различных величин, характеризующих его физические свойства. Опыт показывает, что практически все физические свойства тел изменяются при изменении температуры. Так, при нагревании большинство тел расширяются, т.е. увеличивается их объём. Исключение составляет вода в интервале температур от 0°C до 4°C . От температуры зависят также сопротивление проводников и полупроводников, величина термоэлектрического тока, давление газа в сосуде, спектр теплового излучения нагретых тел и т.д..

Первый прибор для наблюдений за изменением температуры (термоскоп) изобрел в конце XVI века итальянский учёный Галилео Галилей. Термоскоп Галилея представлял собой небольшой стеклянный шарик с припаянной к нему узкой и длинной стеклянной трубкой. Трубка располагалась вертикально, так, что стеклянный шарик оказывался вверху. При этом нижний конец трубки опускался в большой сосуд с водой. По мере нагревания или остывания колбы воздух в ней расширялся или сжимался и уровень воды в горлышке соответственно понижался или повышался. С помощью такого прибора можно было судить только об изменении степени нагретости тел: числовых значений температуры он не показывал, ибо не имел шкалы. Кроме того, уровень воды в трубке зависел не только от температуры, но и от атмосферного давления.

В течение XVII столетия многие исследователи занимались усовершенствованием этого прибора. Его снабдили измерительной шкалой,

откачали воздух, запаяли трубку и перевернули шариком вниз. Сама собой отпала необходимость в большом сосуде. Прибор все чаще стали называть не термоскопом, а термометром.

Показания разных термометров того времени не согласовывались друг с другом, не было договорённости о том, как размечать (градуировать) их шкалы. К концу XVII века все большую популярность приобретала идея построения температурной шкалы на основе использования двух постоянных температурных точек (реперных точек).

В начале XVIII века датский астроном О. Ремер изготовил термометр, где за постоянные точки своей температурной шкалы он принял температуры замерзания и кипения воды.

Идеи Ремера оценил Фаренгейт. Разметка шкалы в его термометре производилась следующим образом. На трубочке отмечались два положения верхней границы столбика жидкости: когда шарик термометра находился в тающем льде (нижняя отметка) и когда шарик находился в кипящей воде (верхняя отметка). Интервал между отметками делился на 180 равных частей, причём первой точке было присвоено значение $32^{\circ}F$, а второй $212^{\circ}F$ (градусов по шкале Фаренгейта).

Важнейшей заслугой Фаренгейта является также то, что он первым начал изготавливать ртутные термометры. В 1721 году комплект фаренгейтовских термометров заказал царь Петр I. Конструкция термометра, разработанная Фаренгейтом, применяется и теперь в комнатных и медицинских термометрах. Фаренгейт занимался не только усовершенствованиями конструкции термометра, но и проводил изучение некоторых тепловых явлений. Так, например, он обнаружил, что различные жидкости кипят при различных, но фиксированных температурах.

Использование термометров конструкции Фаренгейта в исследовании тепловых явлений позволило установить и другие постоянные метки (точки) на температурной шкале. Оказалось, что такими точками являются температуры перехода вещества из твердого состояния в жидкое и из жидкого состояния в газообразное при одних и тех же внешних условиях, например, температуры плавления (таяния) льда и кипения воды.

Андрес Цельсий в качестве нулевой отметки на шкале своего термометра взял уровень ртути, соответствующий температуре кипения воды, а через 100 обозначил уровень, отвечающий температуре таяния льда. Разделив этот интервал на 100 равных частей, Цельсий получил стоградусную шкалу, называемую теперь его именем ($^{\circ}C$). Известный шведский ботаник Карл Линней пользовался термометром с переставленными значениями реперных точек: “0” означал температуру плав-

ления льда, “100” - температуру кипения воды. Таким образом, современная шкала Цельсия по существу является шкалой Линнея.

В современной физике широко используется температурная шкала по Кельвину (К). Температурный интервал между точками плавления льда и кипения воды разделен в ней на 100 равных частей, а температуры плавления льда и кипения воды равны 273,15 К и 373,15 К, соответственно.

Внутренняя энергия тела. Теплопередача

Существует несколько способов изменить температуру тела. В одном из таких способов температуру тела изменяют, нагревая его в пламени сгорающего топлива. При этом говорят, что тепло, выделяющееся при сгорании топлива, пошло на нагревание тела.

Такая терминология появилась примерно в восемнадцатом веке, когда считалось, что в каждом теле содержится некая субстанция, называемая *теплородом*. Считалось, что частицы теплорода отталкиваются друг от друга, но притягиваются частицами обычных веществ. Если тело увеличивает содержание теплорода (тепла), то температура тела увеличивается. Если количество теплорода уменьшается, то температура тела падает. Хотя предмет может казаться холодным, это не значит, что он не содержит тепла. Например, кусок льда способен нагреть кусок сухого льда, причем сам он будет при этом охлаждаться. Теория, описывающая теплоту в виде материальной субстанции (теплорода), получила название *материальной теории теплоты или теории теплорода*.

Хотя эта теория давно уже оставлена, некоторые её термины сохранились в современной науке о теплоте, особенно в тех её разделах, где рассматриваются потоки и перенос тепла. Мы по-прежнему говорим, что тепло течёт, а тело поглощает тепло. Это приводит к некоторой путанице, поскольку мы говорим о теплоте как о какой-то субстанции, даже если мы знаем, что на самом деле это не так.

Понять физическую природу теплоты в термодинамике невозможно без привлечения атомно-молекулярных представлений о строении вещества. С молекулярной точки зрения любое тело состоит из громадного числа мельчайших частиц, называемых молекулами и атомами. Эти частицы находятся в непрерывном тепловом движении.

Процесс нагревания тела в пламени сгорающего топлива выглядит следующим образом. Горение есть химическая реакция соединения двух веществ (обычно кислорода и горючего) и образования новых ве-

ществ. Кинетическая энергия молекул продуктов горения при этом во много раз превосходит первоначальную кинетическую энергию исходных веществ. Образовавшиеся при горении молекулы бомбардируют молекулы вещества, помещенного в пламя горелки.

Кинетическая энергия молекул вещества меньше кинетической энергии “молекул пламени” (молекул веществ, входящих в состав пламени). При столкновении этих молекул часть энергии “молекул пламени” переходит молекулам вещества и энергия этих молекул увеличивается, а энергия “молекул пламени” уменьшается.

Процесс нагревания всегда сопровождается повышением температуры тела. Это позволяет сделать вывод, что увеличение кинетической энергии молекул нагреваемого тела однозначно связано с увеличением температуры тела, а переход тепла есть передача молекулами продуктов горения части своей кинетической энергии молекулам нагреваемого вещества.

В молекулярно-кинетической теории суммарная кинетическая энергия хаотичного движения всех молекул тела плюс суммарная потенциальная энергия взаимодействия этих молекул друг с другом (но не с другими телами) называется внутренней энергией тела.

Если два тела с разными температурами привести в контакт друг с другом, то с течением времени температура этих тел изменится. Одно тело при этом нагреется, а другое остынет. Нагревание одного тела и охлаждение другого тела будут происходить до тех пор, пока их температуры не сравняются.

Как показывает опыт, температура каждого из тел в процессе нагревания или охлаждения в различных точках неодинакова и со временем изменяется. Сначала изменится температура в местах соприкосновения тел. Затем изменение температуры произойдет в точках, прилежащих к месту контакта и, наконец, это изменение температуры захватит самые дальние точки тел. Такой процесс выравнивания температур сопровождается передачей некоторой доли кинетической энергии молекул одной части тела молекулам другой его части, т.е. передачей тепла, а сам процесс перехода тепла от одного конца тела к другому называется теплопроводностью. Важно заметить, что при теплопроводности само вещество не перемещается, а теплопередача всегда идет в определенном направлении: внутренняя энергия горячего тела уменьшается, а внутренняя энергия холодного тела увеличивается.

Чем больше разность температур тел, тем интенсивней при прочих одинаковых условиях протекает процесс передачи тепла от горячего тела к холодному. Когда же температуры тел выравниваются, теплопе-

редача прекращается и наступает тепловое равновесие.

Рассмотрим пример. Когда нагревается холодная вода в кастрюле, поставленной на горячую плиту, происходит передача теплоты сквозь металлические стенки кастрюли. От чего зависит количество теплоты, передаваемой через какую-нибудь стенку? Прежде всего, от разности температур по обе стороны стенки. Чем больше эта разность, тем большее количество теплоты передаётся через стенку за определённый промежуток времени. Это количество теплоты зависит также и от площади стенки. При равных объёмах вода в кастрюле с большой площадью дна нагревается, как известно, быстрее, чем в кастрюле с дном малой площади. Далее, легко убедиться на опыте, что количество теплоты, передаваемое за единицу времени через стенку при определённой разности температур, тем больше, чем тоньше стенка. Наконец, теплопередача сильно зависит от материала стенки.

Способностью проводить тепло или теплопроводностью обладают все вещества. Однако, теплопроводность различных веществ неодинакова. Лучшими проводниками тепла являются металлы. Хуже всех проводят тепло газы. Самым плохим проводником тепла является вакуум. Так называют пространство, в котором отсутствуют атомы или молекулы.

В жидкостях и в газах, кроме теплопроводности, теплопередача часто осуществляется конвекцией, т.е. механическим перемещением нагретых частей. Почти всегда при соприкосновении жидкости или газа с твёрдыми стенками, имеющими более высокую или более низкую температуру, в жидкости (или газе) возникают течения: нагретая жидкость (или газ) поднимается вверх, а охладившаяся опускается вниз. Этот процесс происходит вследствие уменьшения плотности жидкости или газа при повышении их температуры.

Кроме теплопередачи посредством теплопроводности и конвекционных течений, огромное значение в природе и технике имеет теплопередача посредством испускания и поглощения излучения.

Отметим, что при теплопередаче далеко не всегда изменяется тепловое состояние тел, т.е. их температура; например, когда лёд тает, то передача теплоты изменяет состояние тела (лёд из твердого состояния переходит в жидкое), но температура его остается неизменной.

Теплота и работа

Температуру тела можно изменить не только нагревая его в пламени, но и совершая над ним работу. Это знали уже древние люди, добывая огонь трением.

Военный инженер Бенджамин Томпсон (граф Румфорд (1753-1814)) заинтересовался вопросом о получении тепла с помощью трения. Он писал: "... заведя сверлением пушечных стволов в мастерских военного арсенала в Мюнхене, я был сильно поражен тем значительным количеством тепла, которое за короткое время получает медный ствол при сверлении, и еще большим количеством тепла (гораздо большим, как я выяснил из эксперимента, чем тепло, требуемое для закипания воды), которое получают металлические стружки, отделяемые от ствола сверлом".

С помощью теории теплорода было трудно объяснить, откуда берётся такое большое количество тепла. Запас тепла при сверлении казался неистощимым. Румфорд приходит к выводу, что теплота, выделявшаяся при сверлении, есть результат работы силы трения между сверлом и металлом. Кроме того, он выдвигает гипотезу об одинаковой природе теплоты и энергии: "... мне кажется чрезвычайно трудно, если не совершенно невозможным, выдвинуть хоть какую-нибудь разумную идею, объясняющую то, что возбуждалось и передавалось в этих экспериментах, чем-либо отличным от движения".

Среди тех, кто одним из первых понял важность рассмотрения теплоты как энергии, был доктор Юлиус Роберт фон Майер (1814-1878). Он выдвинул предположение, ставшее почти банальным к началу двадцатого века: "... имеющаяся однажды налицо энергия не может превратиться в нуль, а только перейти в другую форму, и, следовательно, спрашивается: какую дальнейшую форму способна принять энергия?"

Развивая свои идеи о связи между энергией и теплом, Майер высказывает свое наиболее проникательное заключение. Если теплота есть форма кинетической и потенциальной энергий, а полная энергия сохраняется, то для получения определённого количества тепла необходимо затратить определённое количество механической энергии. Иными словами, заданная работа приводит к выделению заданного количества тепла. Из экспериментов, проведенных ранее для газов, Майеру удалось получить количественное соотношение между механической работой и теплотой, которое находится в хорошем согласии с результатами современных измерений.

Непосредственное измерение механического эквивалента теплоты осуществил Джеймс Прескотт Джоуль (1818-1889). В течение всей своей жизни Джоуль провел длинную серию экспериментов, в которых различные формы энергии превращались в тепло.

Из результатов опытов Джоуля следовало также, что при уменьшении механической энергии системы тел происходит соответствующее увеличение их внутренней энергии, а уменьшение внутренней энергии связано с увеличением механической энергии. Таким образом, опыты Джоуля дают подтверждение закона сохранения энергии в расширенном смысле. При всех движениях, как происходящих без трения, так и сопровождающихся трением, сумма кинетической, потенциальной и внутренней энергий всех участвующих тел не изменяется.

Количество теплоты. Теплоёмкость

Внутренняя энергия тела зависит от его температуры и внешних условий - объёма и т.д.. Если внешние условия остаются неизменными, т.е. объём и другие параметры постоянны, то внутренняя энергия тела зависит только от его температуры.

Изменить внутреннюю энергию тела можно не только нагревая его в пламени или совершая над ним механическую работу (без изменения положения тела, например, работа силы трения), но и приводя его в контакт с другим телом, имеющим температуру, отличную от температуры данного тела, т.е. посредством теплопередачи.

Количество внутренней энергии, которое тело приобретает или теряет в процессе теплопередачи и называется "количеством теплоты". Количество теплоты принято обозначать буквой Q . Если внутренняя энергия тела в процессе теплопередачи увеличивается, то говорят, что телу сообщили теплоту Q . При уменьшении внутренней энергии в процессе теплопередачи говорят, что от тела отняли (или отвели) количество теплоты Q .

Количество теплоты можно измерять в тех же единицах, в которых измеряется и механическая энергия. В системе СИ - это 1 Джоуль. Существует и другая единица измерения теплоты - калория. Калория - это количество теплоты, необходимое для нагревания 1 г воды на 1°C . Соотношение между этими единицами было установлено Джоулем: $1 \text{ кал} = 4,18 \text{ Дж}$. Это означает, что за счёт работы в 4,18 кДж температура 1 килограмма воды повысится на 1 градус.

Количество теплоты, необходимое для нагревания тела на 1°C , называется теплоёмкостью тела. Теплоёмкость тела обозначается буквой

C . Если телу сообщили небольшое количество теплоты ΔQ , а температура тела изменилась на Δt градусов, то

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta t}. \quad (1.1)$$

Опыт показывает, что при обычных температурах ($200 \div 500$ К) теплоёмкость большинства твёрдых и жидких тел почти не зависит от температуры. Для большинства расчетов будем принимать, что теплоёмкость какого-нибудь вещества есть величина постоянная.

Кроме теплоёмкости тела C , вводят ещё удельную теплоёмкость c , теплоёмкость единицы массы вещества. Именно эта величина обычно приводится в справочниках физических величин. Удельная теплоёмкость c связана с теплоёмкостью тела C и массой m тела соотношением:

$$C = c \cdot m. \quad (1.2)$$

Приведённые формулы позволяют рассчитать, какое количество теплоты Q надо передать телу массы m , чтобы повысить его температуру от значения t_1 до значения t_2 :

$$Q = C \cdot \Delta t = C \cdot (t_2 - t_1) = c \cdot m \cdot (t_2 - t_1). \quad (1.3)$$

Если тело окружить оболочкой, плохо проводящей тепло, то температура тела, если оно предоставлено самому себе, будет оставаться в течение длительного времени практически постоянной. Таких идеальных оболочек в природе, конечно, не существует, но можно создать оболочки, которые по своим свойствам приближаются к таковым.

Примерами могут служить обшивка космических кораблей, сосуды Дьюара, применяемые в физике и технике. Сосуд Дьюара представляет из себя стеклянный или металлический баллон с двойными стенками, между которыми создан высокий вакуум. Стеклянная колба домашнего термоса тоже является сосудом Дьюара.

Теплоизолирующей является оболочка *калориметра* – прибора, позволяющего измерять количество теплоты. Калориметр представляет собой большой тонкостенный стакан, поставленный на кусочки пробки внутрь другого большого стакана так, чтобы между стенками оставался слой воздуха, и закрытый сверху теплопроводящей крышкой.

Если в калориметре привести в тепловой контакт два или несколько тел, имеющих различные температуры, и подождать, то через некоторое время внутри калориметра установится тепловое равновесие. В процессе перехода в тепловое равновесие одни тела будут отдавать тепло (суммарное количество теплоты $Q_{отд}$), другие будут получать тепло (суммарное количество теплоты $Q_{пол}$). А так как калориметр и со-

держась в нём тела не обмениваются теплом с окружающим пространством, а только между собой, то можно записать соотношение, называемое также уравнением теплового баланса:

$$Q_{\text{пол}} = Q_{\text{отд}}. \quad (1.4)$$

В ряде тепловых процессов тепло может поглощаться или выделяться телом без изменения его температуры. Такие тепловые процессы имеют место при изменении агрегатного состояния вещества – плавлении, кристаллизации, испарении, конденсации и кипении. Коротко остановимся на основных характеристиках этих процессов.

Плавление – процесс превращения кристаллического твёрдого тела в жидкость. Процесс плавления происходит при постоянной температуре, тепло при этом поглощается.

Удельная теплота плавления λ равна количеству теплоты, необходимому для того, чтобы расплавить 1 кг кристаллического вещества, взятого при температуре плавления. Количество теплоты $Q_{\text{пл}}$, которое потребуется для перевода твёрдого тела массы m при температуре плавления в жидкое состояние, равно

$$Q_{\text{пл}} = \lambda \cdot m. \quad (1.5)$$

Поскольку температура плавления остается постоянной, то количество теплоты, сообщаемое телу, идет на увеличение потенциальной энергии взаимодействия молекул, при этом происходит разрушение кристаллической решетки.

Процесс кристаллизации – это процесс, обратный процессу плавления. При кристаллизации жидкость превращается в твёрдое тело и выделяется количество теплоты, также определяемое формулой (1.5).

Испарение – это процесс превращения жидкости в пар. Испарение происходит с открытой поверхности жидкости. В процессе испарения жидкость покидают самые быстрые молекулы, т.е. молекулы, способные преодолеть силы притяжения со стороны молекул жидкости. Вследствие этого, если жидкость теплоизолирована, то в процессе испарения она охлаждается.

Удельная теплота парообразования L равна количеству теплоты, необходимому для того, чтобы превратить в пар 1 кг жидкости. Количество теплоты $Q_{\text{исп}}$, которое потребуется для перевода в парообразное состояние жидкость массой m равно

$$Q_{\text{исп}} = L \cdot m. \quad (1.6)$$

Конденсация – процесс обратный процессу испарения. При конденсации пар переходит в жидкость. При этом выделяется тепло. Количество теплоты, выделяющейся при конденсации пара, определяется по формуле (1.6).

Кипение – процесс, при котором давление насыщенных паров жидкости равно атмосферному давлению, поэтому испарение происходит не только с поверхности, но и по всему объёму (в жидкости всегда имеются пузырьки воздуха, при кипении давление паров в них достигает атмосферного и пузырьки поднимаются вверх).

Примеры решения задач

Задача 1. Двигатель скутера развивает полезную мощность $P = 3 \text{ кВт}$ при скорости $v = 36 \text{ км/ч}$. Сколько километров проедет скутер, израсходовав $V = 3 \text{ л}$ бензина, если КПД двигателя $\eta = 20\%$?

Решение. Определим, какое количество теплоты Q выделяется при сгорании объёма V бензина. Для расчёта этой величины нужно знать удельную теплоту сгорания q данного вида топлива (для бензина $q = 46 \text{ МДж/кг}$) и массу m сгоревшего топлива. С учётом того, что $m = \rho V$, где $\rho = 700 \text{ кг/м}^3$ – плотность бензина, получаем

$$Q = qm = q\rho V.$$

Только часть этого количества теплоты расходуется «с пользой» (идёт на создание полезной мощности P). Если двигатель, развивая постоянную мощность P проработал в течение времени τ , то совершённая им работа A равна $P\tau$. Эффективность преобразования теплоты (энергии) Q сгорания топлива в механическую работу A двигателя характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД) двигателя η

$$\eta = \frac{A}{Q} \cdot 100\% = \frac{P\tau}{Q} \cdot 100\%.$$

Отсюда для времени работы двигателя находим

$$\tau = \frac{\eta}{100\%} \cdot \frac{Q}{P}.$$

Теперь для расстояния L , которое проедет скутер на указанном объёме бензина, получаем

$$\begin{aligned} L = v\tau &= \frac{\eta}{100\%} \cdot \frac{Q}{P} \cdot v = \frac{\eta}{100\%} \cdot \frac{q\rho V}{P} \cdot v = \\ &= \frac{20\%}{100\%} \cdot \frac{46 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг} \cdot 700 \text{ кг/м}^3 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{3 \cdot 10^3 \text{ Дж/с}} \cdot 10 \text{ м/с} = 64,4 \text{ км}. \end{aligned}$$

Задача 2. Определите массу льда, взятого при температуре

$t = -10^{\circ}\text{C}$, который можно растопить за 10 минут с помощью электрической плитки, потребляющей от сети мощность 600 Вт? Коэффициент полезного действия (КПД) плитки $\eta = 80\%$.

Решение. Пусть N – мощность, потребляемая от сети плиткой. Тогда за время τ плитка получит от сети энергию $W = N\tau$. Часть этой энергии (по условию задачи 80%) пойдёт на нагревание и плавление льда.

Для нагревания льда массой m от начальной температуры $t = -10^{\circ}\text{C}$ до температуры плавления $t_{\text{пл}} = 0^{\circ}\text{C}$ требуется количество теплоты

$$Q_1 = c_L m (t_{\text{пл}} - t),$$

где $c_L = 2100 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ – удельная теплоёмкость льда.

Для плавления льда массой m при температуре плавления необходимо количество теплоты

$$Q_2 = m\lambda_L,$$

где $\lambda_L = 3,2 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$ – удельная теплота плавления льда.

С учётом того, что $Q_1 + Q_2 = 0,8N\tau$, для массы льда находим

$$m = \frac{0,8N\tau}{c_L (t_{\text{пл}} - t) + \lambda_L} \approx 0,84 \text{ кг}.$$

Задача 3. С какой скоростью должна лететь свинцовая пуля, чтобы при неупругом ударе о деревянную стенку она наполовину расплавилась? Удельная теплоёмкость свинца $c_{\text{св}} = 130 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$, удельная теплота плавления свинца $\lambda_{\text{св}} = 25 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}$, температура плавления свинца $t_{\text{пл}} = 327^{\circ}\text{C}$. Температура пули перед ударом $t_1 = 152^{\circ}\text{C}$. Считать, что 60% теплоты, выделившейся при ударе пули о стену, передаётся пуле.

Решение. Пусть v – скорость пули массой m перед ударом о стену. После удара о стену пуля останавливается. Следовательно, её кинетическая энергия уменьшается от начального значения $mv^2/2$ до нуля. При неупругом ударе полное количество выделившейся теплоты равно убыли механической энергии: $Q_{\text{полн}} = \Delta E_{\text{мех}} = mv^2/2$. В рассматриваемом случае на нагревание и плавление пули идёт только часть всей выделившейся теплоты: $Q_{\text{пули}} = 0,6Q_{\text{полн}}$.

Часть полученной пулей теплоты идёт на её нагревание от начальной температуры t_1 до температуры плавления $t_{\text{пл}}$

$$Q_{\text{пули},1} = c_{\text{св}} m (t_{\text{пл}} - t_1),$$

а оставшаяся часть – на плавление половины пули

$$Q_{\text{пули},2} = 0,5\lambda_{\text{св}}m.$$

С учётом полученных ранее соотношений имеем

$$Q_{\text{пули}} = 0,6 \cdot \frac{mv^2}{2} = Q_{\text{пули},1} + Q_{\text{пули},2} = c_{\text{св}}m(t_{\text{пл}} - t_1) + 0,5\lambda_{\text{св}}m,$$

откуда после преобразований для скорости пули получаем

$$v = \sqrt{\frac{2c_{\text{св}}(t_{\text{пл}} - t_1) + \lambda_{\text{св}}}{0,6}} =$$

$$\approx \sqrt{\frac{2 \cdot 130 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 175 \text{ К} + 25 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}}{0,6}} \approx 343 \text{ м/с}.$$

Задача 4. В железном калориметре массой 100 г находится 600 г воды при температуре 20°С. В калориметр помещаются свинец и алюминий общей массой 300 г и температурой 90°С. В результате температура в калориметре поднимается до 22°С. Определите массы свинца и алюминия. Удельная теплоёмкость свинца $c_{\text{св}} = 130 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, удельная теплоёмкость алюминия $c_{\text{ал}} = 920 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, удельная теплоёмкость железа $c_{\text{ж}} = 460 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, удельная теплоёмкость воды $c_{\text{в}} = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Потерями теплоты пренебречь.

Решение. Теплообмен в калориметре будет происходить до тех пор, пока не установится тепловое равновесие. При достижении теплового равновесия и калориметр и всё, что находится внутри него, будут иметь одинаковую температуру $t = 22^\circ\text{C}$.

Свинец и алюминий при охлаждении до этой температуры отдают теплоту в количестве

$$Q_{\text{отд}} = c_{\text{ал}}M_{\text{ал}}(t_1 - t) + c_{\text{св}}M_{\text{св}}(t_1 - t).$$

Здесь $M_{\text{ал}}$, $M_{\text{св}}$, $c_{\text{ал}}$, $c_{\text{св}}$ – массы и удельные теплоёмкости алюминия и свинца, соответственно, $t_1 = 90^\circ\text{C}$ – их начальная температура, причём между массами свинца и алюминия выполняется соотношение

$$M_{\text{ал}} + M_{\text{св}} = M = 300 \text{ г}.$$

Железный калориметр и вода при нагревании до температуры $t = 22^\circ\text{C}$ получают количество теплоты

$$Q_{\text{пол}} = c_{\text{ж}}M_{\text{ж}}(t - t_2) + c_{\text{в}}M_{\text{в}}(t - t_2).$$

Здесь $t_2 = 20^\circ\text{C}$, $M_{\text{ж}}$, $M_{\text{в}}$, $c_{\text{ж}}$, $c_{\text{в}}$ – массы и удельные теплоёмкости железа и воды, соответственно.

Фраза в конце условия задачи «потерями теплоты пренебречь» означает, что при решении нужно учитывать теплообмен только между

телами, перечисленными в условии.

Так как в нашем случае потерь теплоты нет, то между $Q_{отд}$ и $Q_{пол}$ справедливо соотношение $Q_{пол} = Q_{отд}$ (уравнение теплового баланса):

$$c_{Al}M_{Al}(t_1 - t) + c_{CB}M_{CB}(t_1 - t) = c_{Ж}M_{Ж}(t - t_2) + c_B M_B(t - t_2).$$

Из этого уравнения, с учётом выражения для общей массы свинца и алюминия, получаем:

$$M_{CB} = \frac{c_{Al}M(t_1 - t) - c_{Ж}M_{Ж}(t - t_2) - c_B M_B(t - t_2)}{(c_{Al} - c_{CB})(t_1 - t)} \approx 254 \text{ г.}$$

$$M_{Al} = 46 \text{ г.}$$

Задача 5. В калориметре находятся лёд и вода при температуре $t_1 = 0^\circ \text{C}$. Массы льда и воды одинаковы и равны 500 г . В калориметр вливают воду массой 1 кг при температуре $t_2 = 50^\circ \text{C}$. Какая температура установится в нём? Теплоёмкостью калориметра и потерями теплоты пренебречь. Удельная теплота плавления льда $\lambda_{л} = 3,2 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$, удельная теплоёмкость воды $c_B = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$.

Решение. Особенной температурой в данной ситуации является температура $t_1 = 0^\circ \text{C}$ – температура таяния льда (или замерзания воды). Если количество теплоты, которое может отдать горячая вода при остывании до этой температуры, больше количества теплоты, необходимого для плавления всей массы льда, то в системе установится температура $t > 0^\circ \text{C}$. Допустим, что это так.

Для составления уравнения теплового баланса определим, какое количество теплоты могут отдать одни элементы системы, а какое количество теплоты могут получить другие. Теплоту отдаёт горячая вода при охлаждении от температуры $t_2 = 50^\circ \text{C}$ до искомой температуры t . Теплоту получают: лёд (при плавлении) и холодная вода при нагревании от температуры $t_1 = 0^\circ \text{C}$ до температуры t .

Для плавления льда массой $m_1 = 0,5 \text{ кг}$ при температуре плавления необходимо количество теплоты Q_1 : $Q_1 = \lambda_{л} m_1$.
Здесь $\lambda_{л}$ – удельная теплота плавления льда.

После того, как весь лёд растает, общая масса холодной воды в калориметре составит $m_2 = 1 \text{ кг}$.

Количество теплоты Q_2 , необходимое для нагревания холодной воды массой $m_2 = 1 \text{ кг}$ от температуры $t_1 = 0^\circ \text{C}$ до температуры t , равно

$$Q_2 = c_B m_2 (t - t_1).$$

Здесь c_B - удельная теплоёмкость воды.

Количество теплоты Q_3 , отдаваемое горячей водой массой $m = 1$ кг при охлаждении её от температуры $t_2 = 50^\circ\text{C}$ до температуры t , есть

$$Q_3 = c_B m (t_2 - t).$$

Составим уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{ПОЛ}} = Q_1 + Q_2 = \lambda_{\text{Л}} m_1 + c_B m_2 (t - t_1) = Q_{\text{ОТД}} = Q_3 = c_B m (t_2 - t).$$

Для искомой температуры t из этого уравнения получаем:

$$t = \frac{c_B m t_2 - \lambda_{\text{Л}} m_1 + c_B m_2 t_1}{c_B m_2 + c_B m} \approx 5,95^\circ\text{C}.$$

Получившаяся температура больше 0°C , следовательно, сделанное выше предположение ($t > 0^\circ\text{C}$) оказалось верным и в сосуде установится температура $5,4^\circ\text{C}$.

Задача 6. В калориметр, содержащий лёд массой $m = 100$ г при температуре $t = 0^\circ\text{C}$, впускают некоторую массу пара при температуре $t_{\text{П}} = 100^\circ\text{C}$. После установления равновесия весь лёд растаял и в калориметре оказалась только вода при температуре $t = 0^\circ\text{C}$. Какова масса воды? Теплоёмкостью калориметра и потерями теплоты пренебречь. Удельная теплота плавления льда $\lambda_{\text{Л}} = 3,3 \cdot 10^5$ Дж/кг, удельная теплота парообразования воды $L_B = 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг, удельная теплоёмкость воды $c_B = 4200$ Дж/(кг · К).

Решение. Для составления уравнения теплового баланса определим, какое количество теплоты могут отдать одни элементы системы, а какое количество теплоты могут получить другие. Теплоту отдаёт пар при конденсации, горячая вода при охлаждении от температуры $t_{\text{П}} = 100^\circ\text{C}$ до температуры $t = 0^\circ\text{C}$. Теплоту получает лёд (при плавлении).

Для плавления льда массой $m = 0,1$ кг при температуре плавления необходимо количество теплоты Q_1 : $Q_1 = \lambda_{\text{Л}} m$.

Здесь $\lambda_{\text{Л}}$ – удельная теплота плавления льда.

Пусть $m_{\text{П}}$ – масса пара, запущенного в калориметр. При конденсации пара он отдаёт количество теплоты $Q_2 = L_B m_{\text{П}}$.

Количество теплоты Q_3 , отдаваемое получившейся при конденсации пара горячей водой при охлаждении её от температуры $t_{\text{П}} = 100^\circ\text{C}$ до температуры $t = 0^\circ\text{C}$, есть

$$Q_3 = c_B m_{\text{П}} (t_{\text{П}} - t).$$

Составим уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{ПОЛ}} = Q_1 = \lambda_{\text{Л}} m = Q_{\text{ОТД}} = Q_2 + Q_3 = L_B m_{\text{П}} + c_B m_{\text{П}} (t_{\text{П}} - t).$$

Из этого уравнения для массы пара получаем:

$$m_{II} = \frac{\lambda_{л} m}{L_B + c_B (t_{II} - t)} \approx 12 \text{ г.}$$

Таким образом, масса воды в калориметре равна $m + m_{II} = 112 \text{ г.}$

Контрольные вопросы

1. Холодные и горячие тела отделены друг от друга проводящей теплоту перегородкой. От каких характеристик (свойств) перегородки и тел зависит количество теплоты, передаваемой через неё в единицу времени (скорость теплопередачи)?

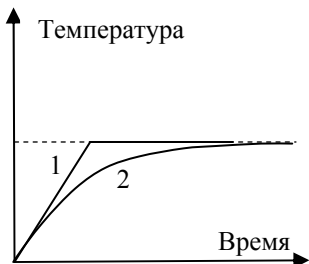


Рис.1

2. Медицинская сестра измеряет температуру ученику 8 класса ртутным медицинским термометром. Какой из двух приведённых на рисунке 1 графиков изменения показаний термометра со временем точнее показывает эти изменения? Ответ обоснуйте.

3. Теплоёмкость стального шарика объёмом $V = 100 \text{ см}^3$ равна $300 \text{ Дж} / \text{К}$. Имеет ли этот шарик полость? Плотность

стали $\rho_{ст} = 7800 \text{ кг} / \text{м}^3$, удельная теплоёмкость стали

$$c_{ст} = 500 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К}).$$

4. Какие вещества можно расплавить в алюминиевом сосуде? Приведите примеры и обоснуйте ваш ответ.

5. Кусок металла и кусок дерева имеют одинаковую температуру. Почему на ощупь холодный металл кажется холоднее дерева, а горячий металл – горячее дерева? При какой температуре и металл и дерево будут казаться на ощупь одинаковыми?

6. Будет ли кипеть вода в кастрюле, которая плавает в другой кастрюле с кипящей водой?

7*. Почему тонкая медная проволока плавится в пламени газовой горелки, в то время как толстый медный гвоздь даже не раскалится до красна.

Задачи

1. Для расплавления $m = 1000 \text{ кг}$ стали используется электропечь мощностью $P = 100 \text{ кВт}$. Сколько времени продолжится плавка, если слиток для начала плавления надо нагреть на $\Delta T = 1500 \text{ К}$? Удельная теплоёмкость стали $c_{ст} = 500 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$, удельная теплота плавления стали $\lambda_{ст} = 2,7 \cdot 10^5 \text{ Дж} / \text{кг}$. Считать, что вся мощ-

ность печи идёт на нагрев и плавление стали.

2. Найдите расход бензина автомобиля (в литрах) на 100 км пути при скорости $v = 60 \text{ км/ч}$. Мощность двигателя автомобиля $P = 20 \text{ кВт}$, коэффициент полезного действия $\eta = 30\%$.

3. Свинцовая пуля, летевшая со скоростью $v_1 = 500 \text{ м/с}$, пробивает стену. Определите, на сколько градусов нагрелась пуля, если её скорость уменьшилась до значения $v_2 = 400 \text{ м/с}$. Считать, что 50% теплоты, выделившейся при ударе пули о стену, передаётся пуле. Удельная теплоёмкость свинца $c_{\text{св}} = 130 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$. Считать, что конечная температура пули меньше температуры плавления свинца.

4. В калориметр, содержащий $M_B = 2,35 \text{ кг}$ воды при температуре $T_1 = 293 \text{ К}$, опускают кусок олова, нагретого до температуры $T_2 = 503 \text{ К}$. После установления равновесия температура воды в калориметре повысилась на $\Delta T = 15 \text{ К}$. Определите массу олова. Удельная теплоёмкость олова $c_{\text{ол}} = 250 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$. Теплоёмкостью калориметра и испарением воды пренебречь.

5. В латунном сосуде массой $m_L = 0,2 \text{ кг}$ находится анилин массой $m_1 = 0,4 \text{ кг}$ при температуре $t_1 = 10^\circ \text{C}$. В сосуд долили $m_2 = 0,4 \text{ кг}$ анилина, имевшего температуру $t_2 = 31^\circ \text{C}$. После установления теплового равновесия температура в сосуде оказалась равной $t = 20^\circ \text{C}$. Найдите удельную теплоёмкость анилина. Удельную теплоёмкость латуни считать равной $c_L = 380 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$. Потерями теплоты пренебречь.

6*. В медном калориметре массой $M_M = 400 \text{ г}$ находится вода массой $M_B = 500 \text{ г}$ при температуре 40°C . В калориметр помещают кусок льда при температуре -10°C . Когда установилось тепловое равновесие, оказалось, что в калориметре остался нерасплавленный лёд массой 75 г . Определите начальную массу льда. Удельная теплоёмкость льда $c_L = 2100 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, удельная теплота плавления льда $\lambda_L = 3,2 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$, удельная теплоёмкость воды $c_B = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, удельная теплоёмкость меди $c_M = 400 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$. Потерями теплоты пренебречь.

7*. В колбе находится вода при температуре $t_0 = 0^\circ \text{C}$. Откачивая из колбы воздух и водяные пары, всю воду заморозили. Какая часть воды испарилась, если притока теплоты извне не было? Удельная теплота плавления льда $\lambda_L = 3,2 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$, удельная теплота парообразования воды $L_B = 2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$.